



Prix Pierre Londe 2015



**Solenn Le Pense**

Modélisation hydro-mécanique  
du couplage endommagement-plasticité  
dans les géomatériaux non saturés



UNIVERSITÉ  
— PARIS-EST

Directeurs de thèse :

Ahmad POUYA

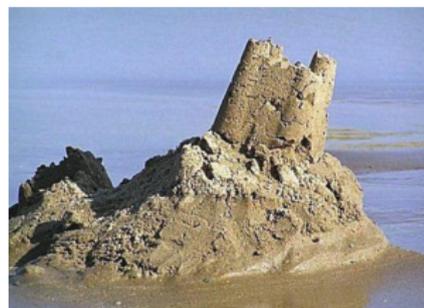
Behrouz GATMIRI



3 décembre 2015

# Mécanique des géomatériaux multiphasiques

Modification des propriétés mécaniques en fonction de la teneur en eau :



Fissuration induite par une modification de la teneur en eau :



# Stockage de déchets radioactifs à grande profondeur

## Laboratoires souterrains

France

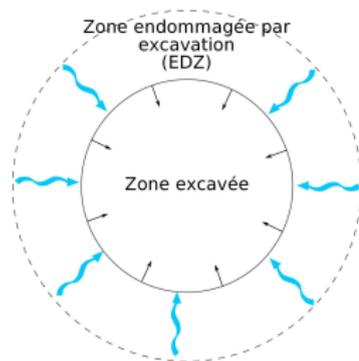
Argilite de Bure  
prof. 490m

Belgique

Argile de Boom  
prof. 224m



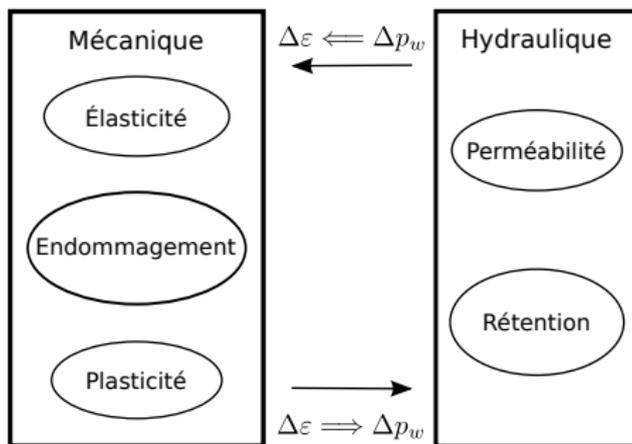
Front d'excavation dans l'argile de Boom - galerie de diamètre 2.5 m  
(Van Marcke and Bastiaens, 2010)



- Excavation  $\implies$  décompression
- Redistribution des contraintes
- Création d'une zone endommagée par excavation (EDZ)
- Modification de la perméabilité
- Désaturation induite par la ventilation

# Objectifs de la thèse

- Développement d'un cadre de modélisation pour le comportement mécanique des géomatériaux non-saturés incorporant les phénomènes dissipatifs d'endommagement et de plasticité.

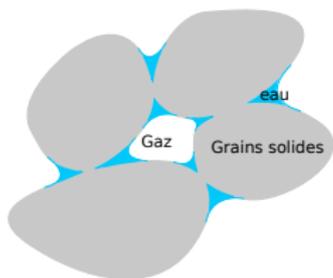


- Implémentation dans un code aux éléments finis pour simulation de problèmes couplés 1D et 2D

- 1 Modélisation
- 2 Simulation d'essais de laboratoire
- 3 Application à des problèmes hydro-mécaniques couplés en géomécanique
- 4 Conclusions

- 1 Modélisation
- 2 Simulation d'essais de laboratoire
- 3 Application à des problèmes hydro-mécaniques couplés en géomécanique
- 4 Conclusions

## Géomatériaux non saturés



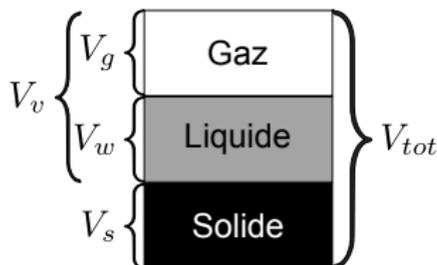
**Trois phases :**

**Solide :** squelette solide

**Liquide :** eau, air dissous

**Gaz :** air et vapeur d'eau

- Porosité :  $\phi = \frac{V_v}{V_{tot}}$
- Degré de saturation :  $S_l = \frac{V_w}{V_v}$
- Succion :  $s = p_g - p_l$



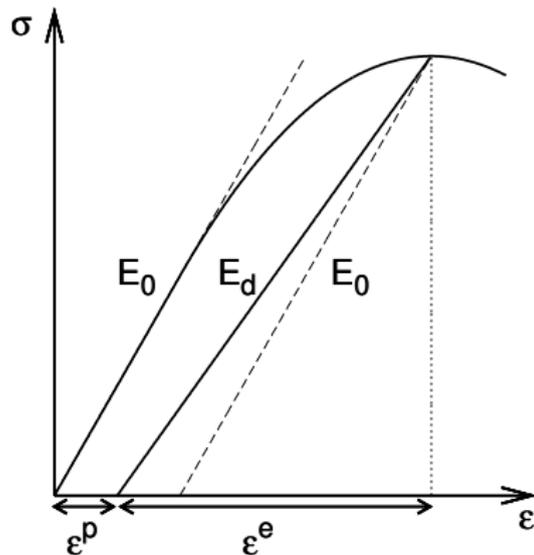
# Phénomènes dissipatifs

## Plasticité :

- Déformations irréversibles

## Endommagement :

- Création de micro-fissures
- Dégradation des propriétés élastiques
- Modification des propriétés de transfert



## 1 Modélisation

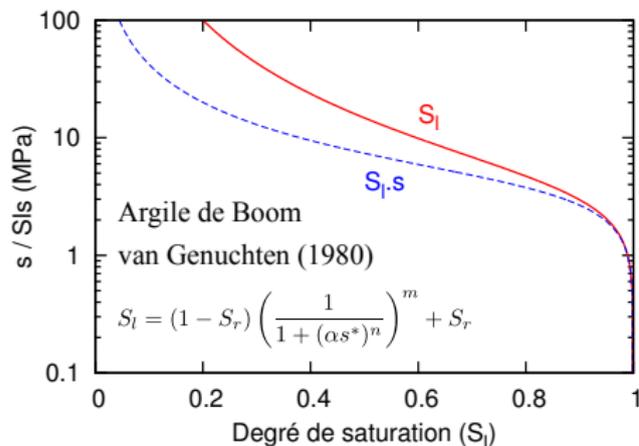
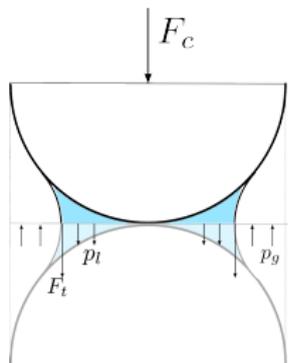
- Contrainte doublement effective prenant en compte les effets de l'endommagement et de la non-saturation
- Phénomènes dissipatifs - Endommagement et plasticité

## 2 Simulation d'essais de laboratoire

## 3 Application à des problèmes hydro-mécaniques couplés en géomécanique

## 4 Conclusions

## Variables d'état pour les sols non saturés



Contrainte effective

(effets de la non-saturation) :

$$\begin{aligned} \sigma^* &= \sigma - [p_l S_l + (1 - S_l) p_g] \mathbf{I} \\ &= \sigma^{net} + s S_l \mathbf{I} \end{aligned}$$

Élasticité :

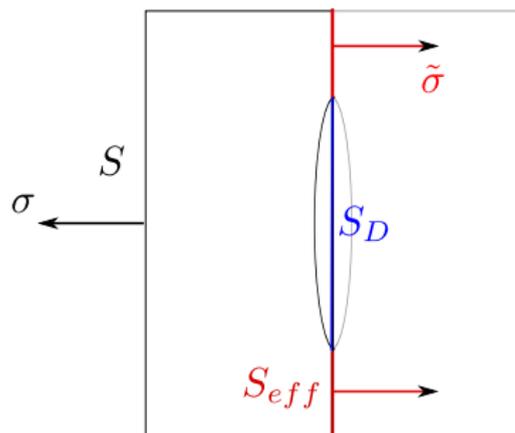
$$\dot{\sigma}^* = \mathbf{D}_e(\sigma^*) \dot{\epsilon}^e$$

Propriétés de rétention :

$$S_l = f(s^*)$$

# Endommagement

Principe de la contrainte effective (Kachanov, 1958)



Section résistante diminue avec l'endommagement

$$F = \sigma S = \tilde{\sigma} S_{eff}$$

$$\tilde{\sigma} > \sigma$$

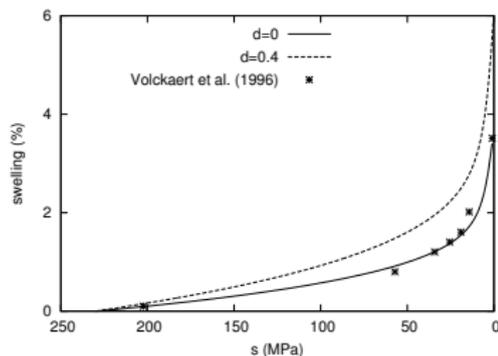
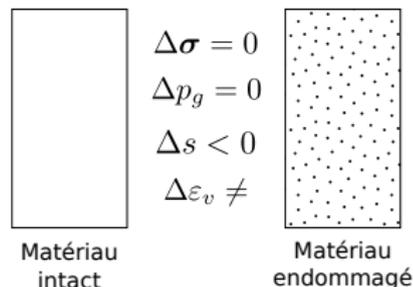
$$d = \frac{S_D}{S} \implies \tilde{\sigma} = \frac{\sigma}{1-d}$$

Extension à un tenseur de contrainte (hypothèse d'isotropie) :  $\tilde{\boldsymbol{\sigma}} = \frac{\boldsymbol{\sigma}}{1-d}$

# Contrainte doublement effective

	Hypothèse 1	Hypothèse 2
$\tilde{\sigma}^*$	$\frac{\sigma^*}{1-d}$	$\tilde{\sigma} - p_g \mathbf{I} + S_l s \mathbf{I}$
	$\frac{\sigma - p_g \mathbf{I} + S_l s \mathbf{I}}{1-d}$	$\frac{\sigma}{1-d} - p_g \mathbf{I} + S_l s \mathbf{I}$
$\dot{\tilde{\sigma}}^*$	$\frac{(\dot{S}_l s + S_l \dot{s}) \mathbf{I}}{1-d}$	$(\dot{S}_l s + S_l \dot{s}) \mathbf{I}$

## Essai de gonflement libre

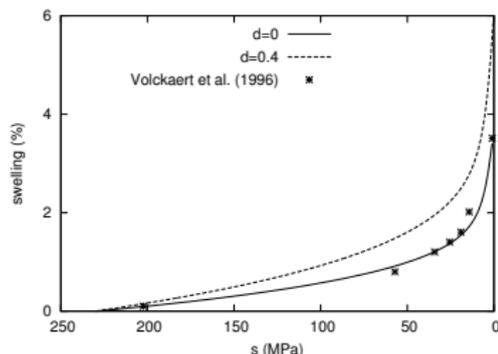
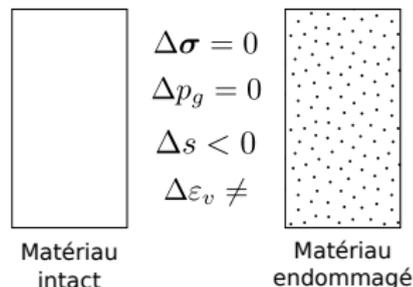


Essai de gonflement oedométrique

# Contrainte doublement effective

	Hypothèse 1	Hypothèse 2
$\tilde{\sigma}^*$	$\frac{\sigma^*}{1-d}$ $\frac{\sigma - p_g \mathbf{I} + S_l s \mathbf{I}}{1-d}$	$\tilde{\sigma} - p_g \mathbf{I} + S_l s \mathbf{I}$ $\frac{\sigma}{1-d} - p_g \mathbf{I} + S_l s \mathbf{I}$
$\dot{\tilde{\sigma}}^*$	$\frac{(\dot{S}_l s + S_l \dot{s}) \mathbf{I}}{1-d}$	$(\dot{S}_l s + S_l \dot{s}) \mathbf{I}$

## Essai de gonflement libre



Essai de gonflement oedométrique

## 1 Modélisation

- Contrainte doublement effective prenant en compte les effets de l'endommagement et de la non-saturation
- Phénomènes dissipatifs - Endommagement et plasticité

## 2 Simulation d'essais de laboratoire

## 3 Application à des problèmes hydro-mécaniques couplés en géomécanique

## 4 Conclusions

## Stratégie pour la modélisation de l'endommagement

Contrainte doublement effective

$$\tilde{\sigma}^* = f(\sigma, s, d)$$

+

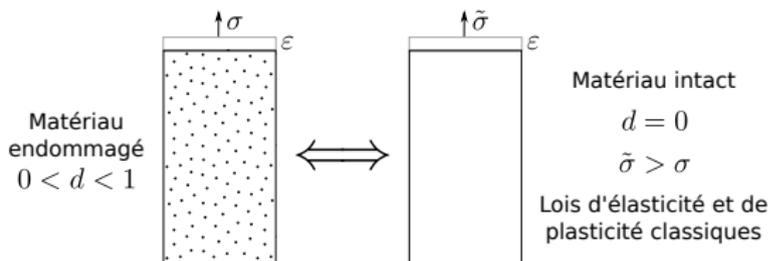
Élasticité :

$$\dot{\tilde{\sigma}}^* = \mathbf{D}_e(\tilde{\sigma}^*) \dot{\epsilon}^e$$

Principe d'équivalence des déformations

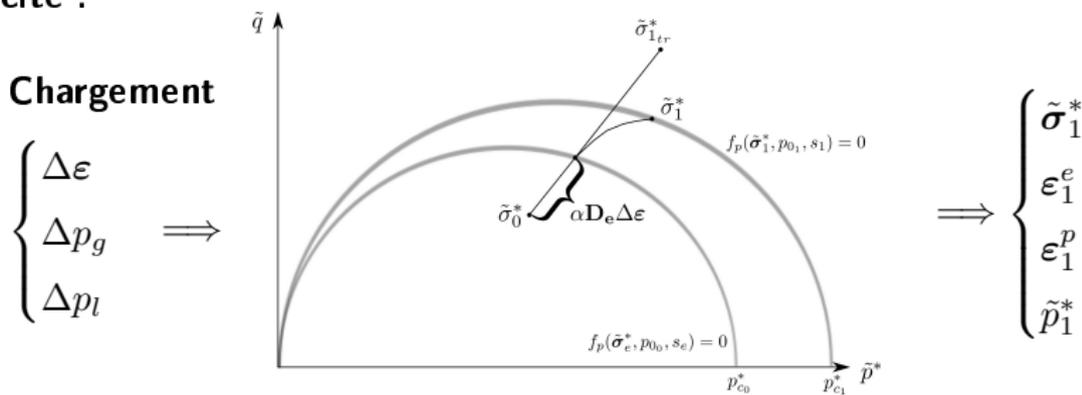
(Lemaitre and Chaboche, 1978)

⇒

Critères d'endommagement  
et de plasticité fonction de  
la contrainte doublement  
effective

## Algorithme local

- **Contrainte doublement effective** :  $\tilde{\sigma}_0^* = f(\sigma_0, s_0, d_0)$
- **Plasticité** :



- **Endommagement** :

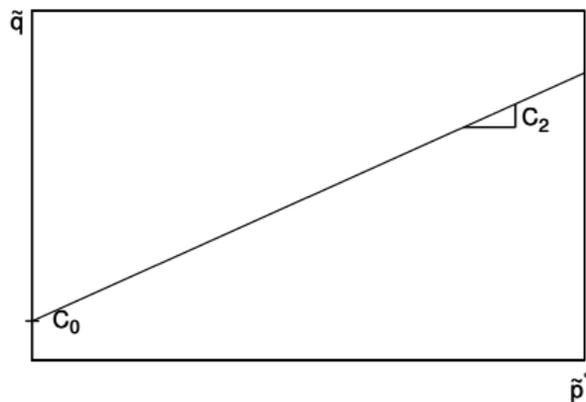
$$d_1 = d_0 + \Delta d$$

$$\Delta d = f(\Delta \tilde{\sigma}^*)$$

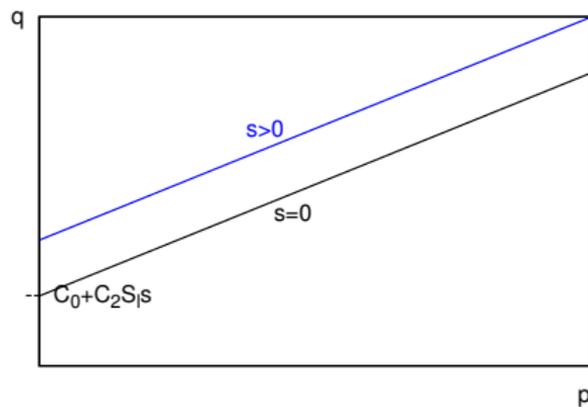
- **État final - Calcul de la contrainte totale** :

$$\sigma_1 = \tilde{\sigma}_1^*(1 - d_1) + p_{g1} \mathbf{I}_d - S_l(s_1) s_1 \mathbf{I}_d$$

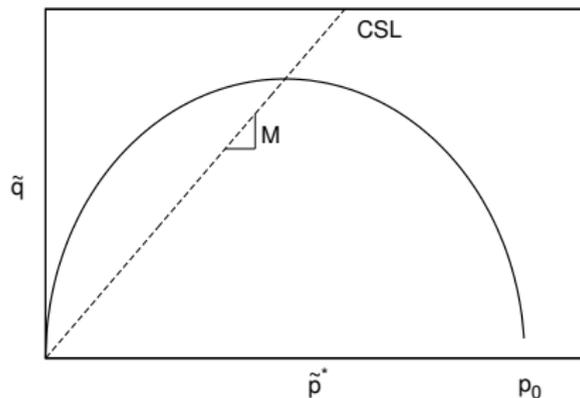
## Critère d'endommagement

Contraintes effectives :  $f_d(\tilde{\sigma}^*)$ Contraintes totales :  $f_d(\sigma, s)$ 

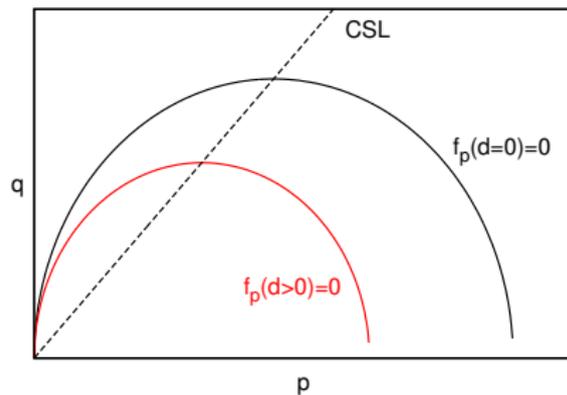
Effet de la succion



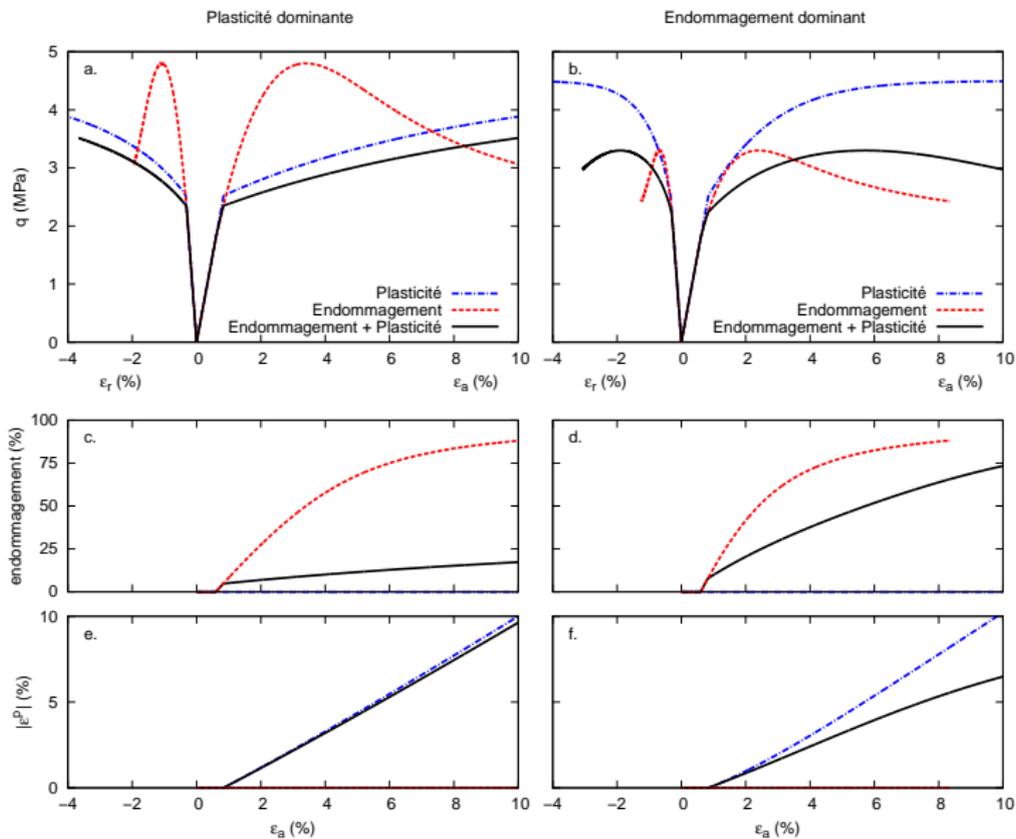
## Critère de plasticité

Contraintes effectives :  $f_p(\tilde{\sigma}^*)$ Contraintes totales :  $f_p(\sigma, d)$ 

Effet de l'endommagement



## Couplage endommagement-plasticité

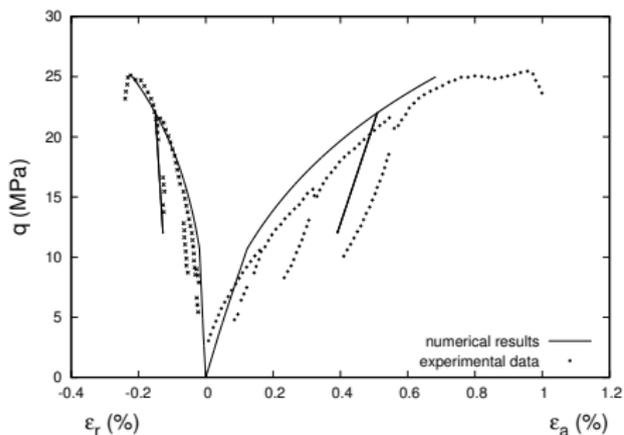


- 1 Modélisation
- 2 Simulation d'essais de laboratoire
- 3 Application à des problèmes hydro-mécaniques couplés en géomécanique
- 4 Conclusions

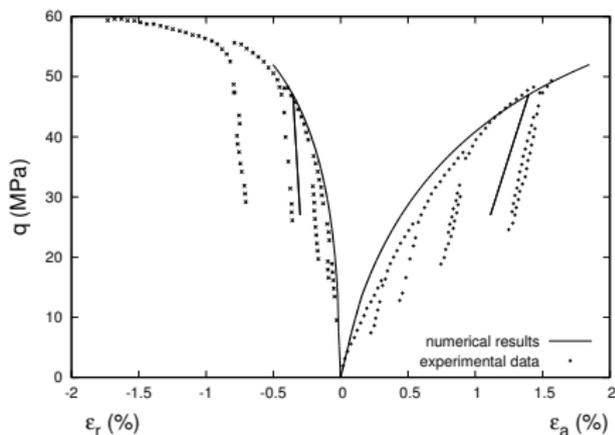
## Argilite du Callovo-Oxfordien - Comportement mécanique

Élasticité		Plasticité				Endommagement		
$K$	$\nu$	$M$	$\lambda_0$	$\eta_d$	$p_0$	$C_0$	$C_1$	$C_2$
GPa			$\text{GPa}^{-1}$		MPa	MPa	MPa	
5	0.19	0.25	0.2	0.05	100	0	200	0.2

## Essai de compression triaxiale (Chiarelli, 2000)



Confinement 0 MPa

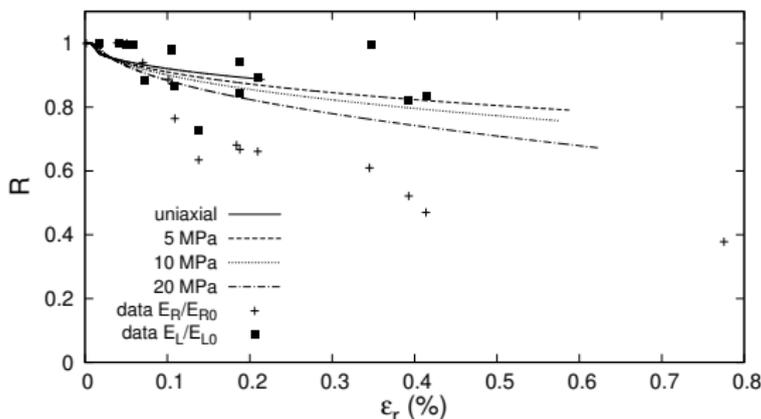


Confinement 20 MPa

## Argilite du Calovo-Oxfordien - Comportement mécanique

Élasticité		Plasticité				Endommagement		
$K$	$\nu$	$M$	$\lambda_0$	$\eta_d$	$p_0$	$C_0$	$C_1$	$C_2$
GPa			$\text{GPa}^{-1}$		MPa	MPa	MPa	
5	0.19	0.25	0.2	0.05	100	0	200	0.2

Essai de compression triaxiale (Chiarelli, 2000)

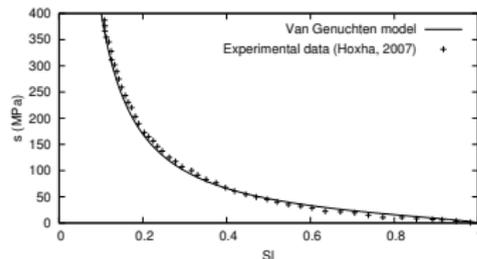


*Évolution du module de compressibilité apparent avec la déformation axiale*

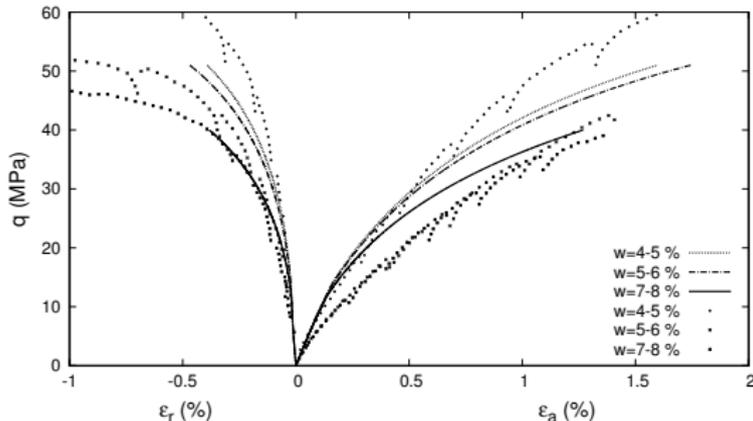
## Comportement hydromécanique

*Paramètres de la courbe de rétention*

$\alpha_{vg}$ (MPa <sup>-1</sup> )	$n_{vg}$	$m_{vg}$
0.04	1.5	0.55



*Courbe de rétention (Hoxha et al., 2007)*



*Courbes contrainte-déformation pour différents teneurs en eau (confinement 20 MPa)*

- 1 Modélisation
- 2 Simulation d'essais de laboratoire
- 3 Application à des problèmes hydro-mécaniques couplés en géomécanique
- 4 Conclusions

# Implémentation numérique - Équations du problème couplé

**Équations d'équilibre :**  $\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \dot{\mathbf{b}} = 0$

$$\dot{\rho}_w + \nabla \cdot (\rho_w \mathbf{V}_w) = 0$$

**Lois constitutives :** Solide :  $\dot{\boldsymbol{\sigma}} = \mathbf{D}_{\text{dep}}(\tilde{\boldsymbol{\sigma}}^*, d)\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} + \mathbf{F}_s(\tilde{\boldsymbol{\sigma}}^*, d)\dot{p}_l$

Eau :  $\mathbf{V}_w = -K_w \nabla \left( -\frac{s}{\gamma_w} + z \right)$

$$K_w(\phi, S_l) = K_{w0} \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2} \frac{(1-\phi_0)^2}{\phi_0^3} \left( \frac{S_l - S_r}{1 - S_r} \right)^n$$

**Implémentation numérique :** Code  $\theta$ -Stock ([Gatmiri and Arson, 2008](#))

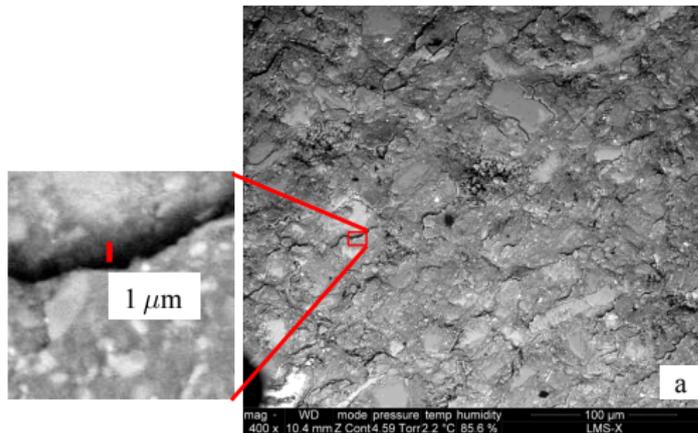
- Discrétisation dans l'espace (Éléments finis) et dans le temps ( $\theta$ -method).

- $$\begin{bmatrix} \mathbf{R}_{uu} & \mathbf{R}_{uw} \\ \mathbf{C}_{wu} & \mathbf{C}_{ww} + \theta \Delta t \mathbf{K}_{ww} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \mathbf{u} \\ \Delta \mathbf{p}_w \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta \mathbf{F}_\sigma \\ \theta \Delta t \Delta \mathbf{F}_w \end{Bmatrix} + \Delta t \begin{Bmatrix} 0 \\ \mathbf{F}_{wn} - \mathbf{K}_{ww} \mathbf{p}_{wn} \end{Bmatrix}$$

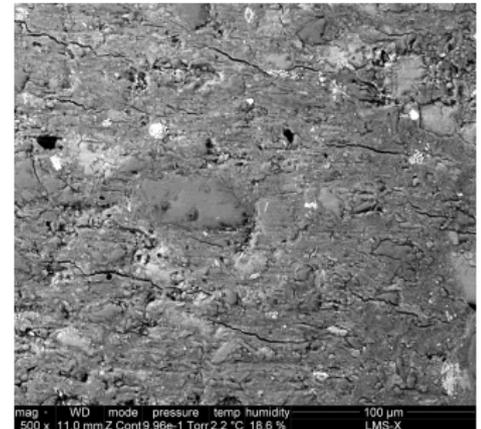
- Méthode de Newton-Raphson modifiée + algorithme local

- 1 Modélisation
- 2 Simulation d'essais de laboratoire
- 3 Application à des problèmes hydro-mécaniques couplés en géomécanique
  - Endommagement due à un chargement hydrique
  - Excavation non drainée
- 4 Conclusions

# Micro-fissuration lors d'un chargement hydrique



*Humidification de 65 à 90 % RH (Wang, 2012)*

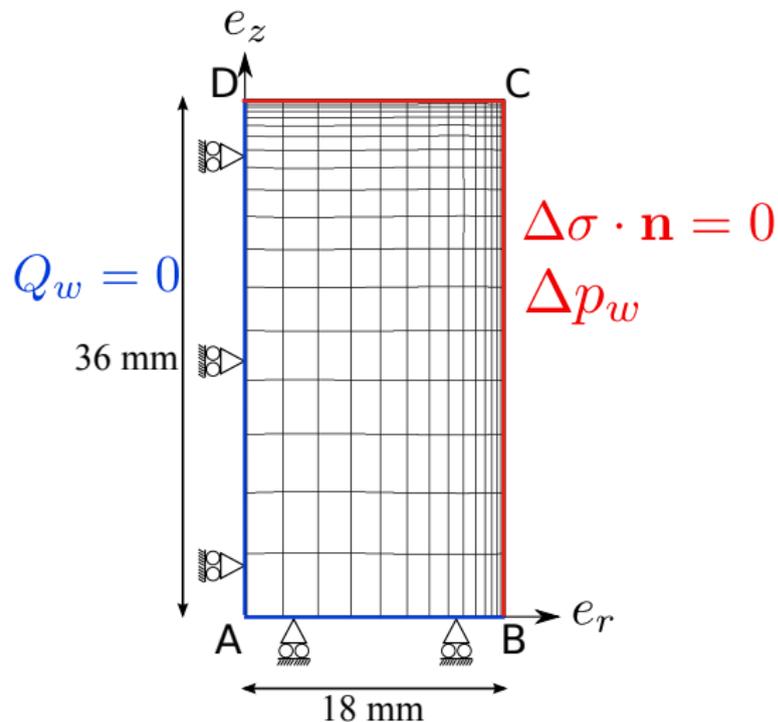


*Dessiccation de 65 à 20 % RH*

- Initiation de la micro-fissuration lors du chargement
- Sensible à la vitesse de chargement

## Modélisation

Problème axisymétrique

**Conditions initiales :**

- $\sigma_r = \sigma_\theta = \sigma_z = 0$  MPa
- succion initiale,  $s_0$

**Chargement :**

- Succion finale,  $s_1$
- Vitesse de chargement
- $p_g = p_{g0} = 0$  MPa

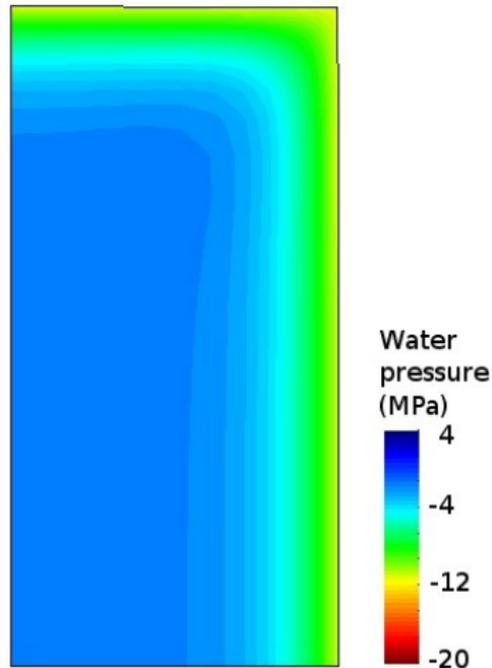
**Conductivité hydraulique :**

- $K_{w0}$

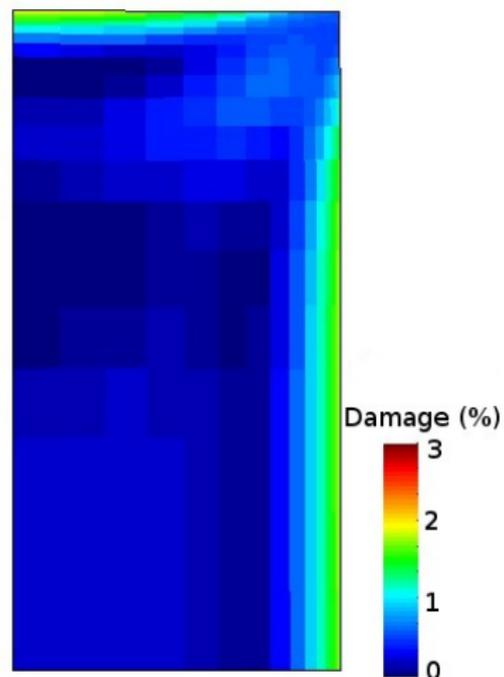
## Dessiccation

$$K_{w0} = 1.10^{-15} \text{ m.s}^{-1}, s_0 = 2 \text{ MPa}, s_1 = 20 \text{ MPa}, 0.2 \text{ MPa/min}$$

Pression d'eau

 $t=45\text{min}$ 

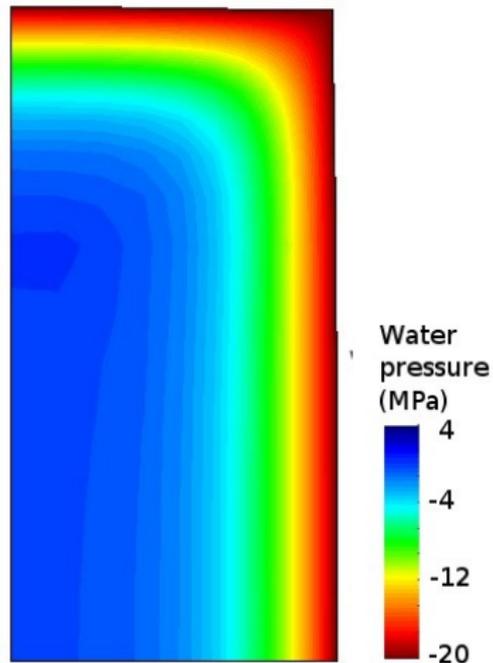
Endommagement

 $t=45\text{min}$

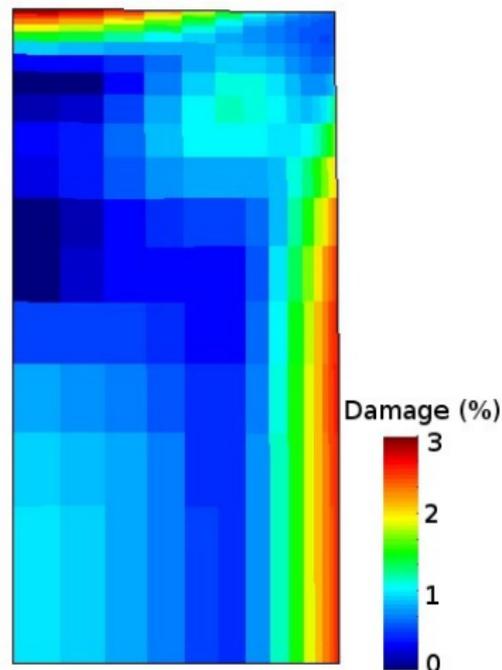
## Dessiccation

$$K_{w0} = 1.10^{-15} \text{ m.s}^{-1}, s_0 = 2 \text{ MPa}, s_1 = 20 \text{ MPa}, 0.2 \text{ MPa/min}$$

Pression d'eau

 $t=1h30$ 

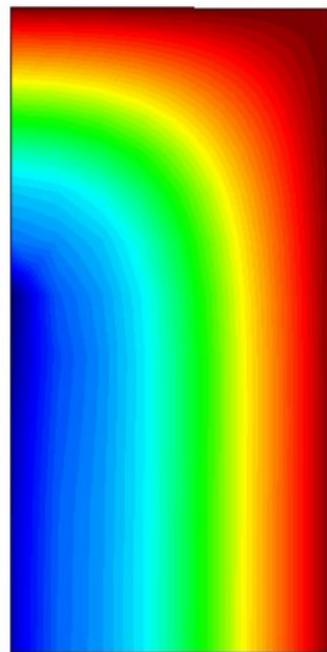
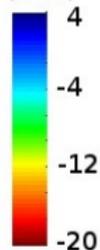
Endommagement

 $t=1h30$

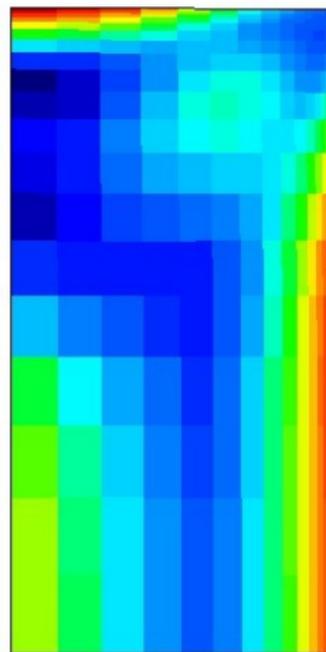
## Dessiccation

$$K_{w0} = 1.10^{-15} \text{ m.s}^{-1}, s_0 = 2 \text{ MPa}, s_1 = 20 \text{ MPa}, 0.2 \text{ MPa/min}$$

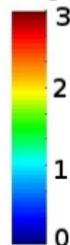
Pression d'eau

 $t=3h$ Water  
pressure  
(MPa)

Endommagement

 $t=3h$ 

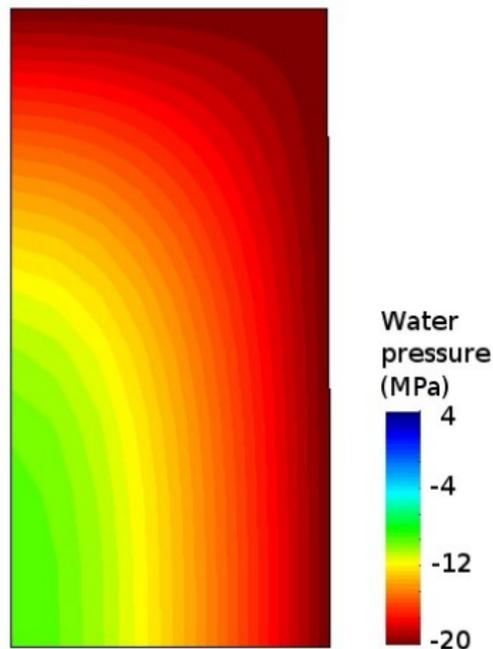
Damage (%)



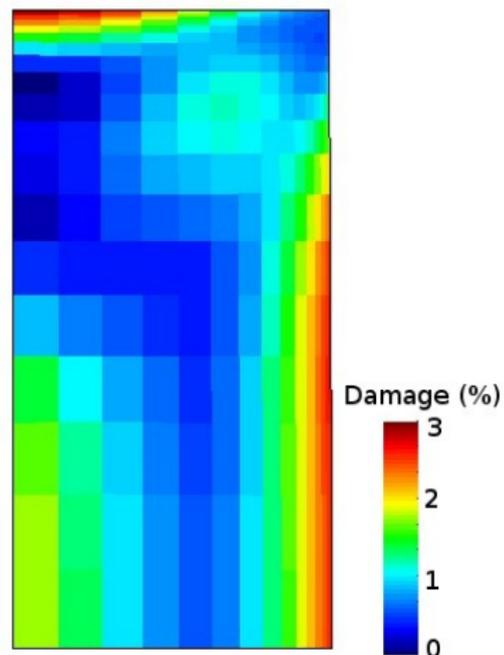
## Dessiccation

$$K_{w0} = 1.10^{-15} \text{ m.s}^{-1}, s_0 = 2 \text{ MPa}, s_1 = 20 \text{ MPa}, 0.2 \text{ MPa/min}$$

Pression d'eau

 $t=6h$ 

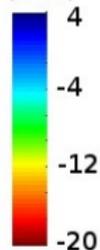
Endommagement

 $t=6h$

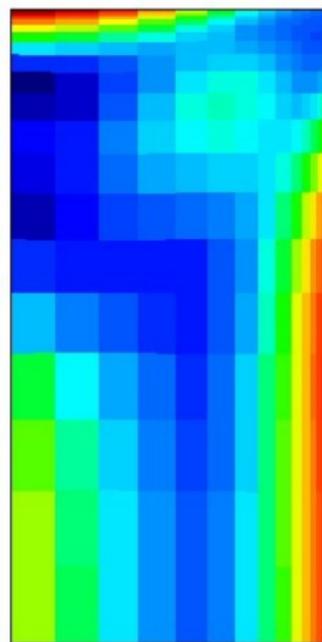
## Dessiccation

$$K_{w0} = 1.10^{-15} \text{ m.s}^{-1}, s_0 = 2 \text{ MPa}, s_1 = 20 \text{ MPa}, 0.2 \text{ MPa/min}$$

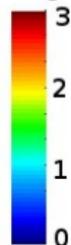
Pression d'eau

 $t=20h$ Water  
pressure  
(MPa)

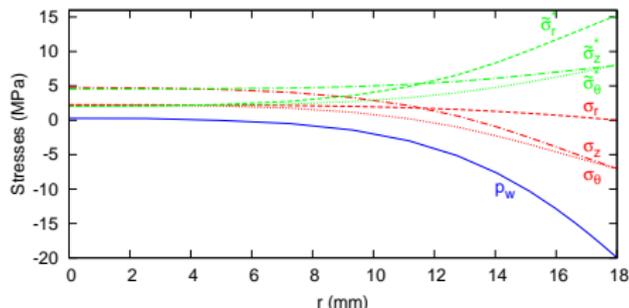
Endommagement

 $t=20h$ 

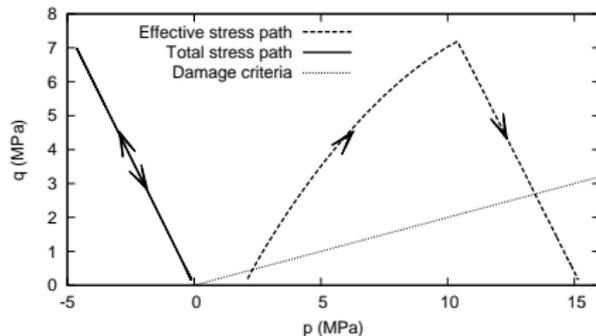
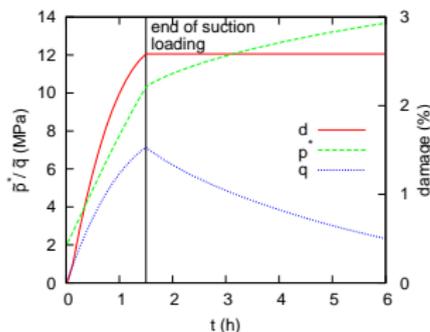
Damage (%)



## Dessiccation - Analyse des contraintes

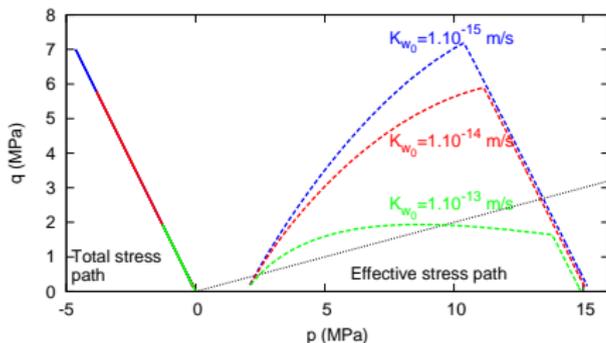
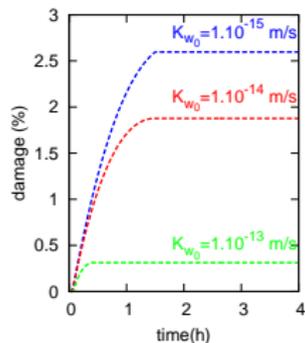
Distribution spatiale des contraintes (AB) -  $t=1h30$ 

Évolution des contraintes à la surface de l'échantillon (Point B)

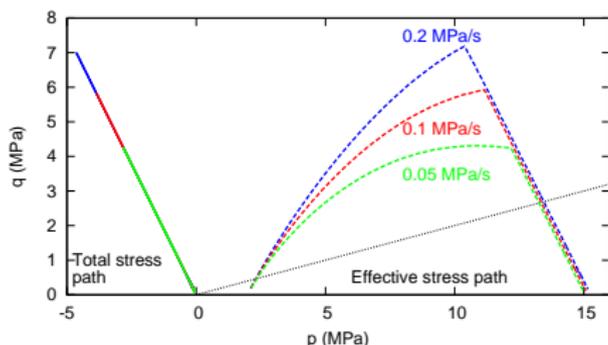
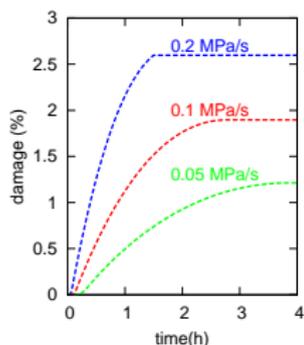


## Dessiccation

## Effet de la perméabilité



## Effet de la vitesse de chargement

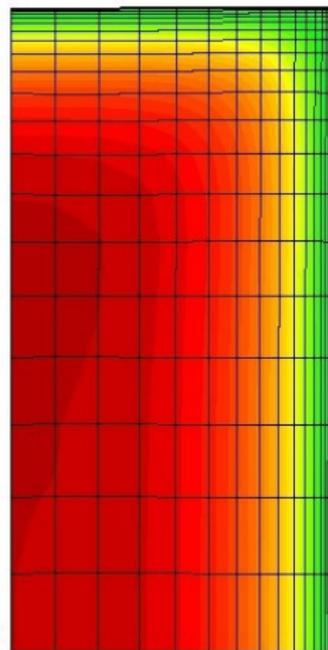


# Humidification

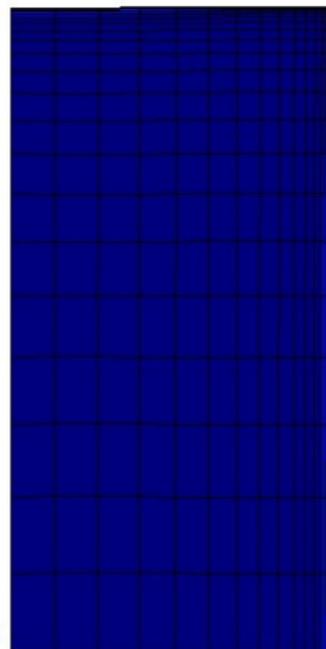
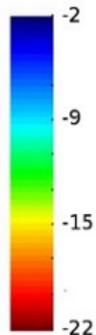
$$K_{w0} = 1.10^{-15} \text{ m.s}^{-1}, s_0 = 20 \text{ MPa}, s_1 = 2 \text{ MPa}, 0.2 \text{ MPa/min}$$

Pression d'eau

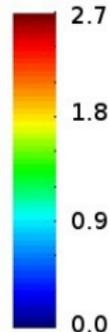
Endommagement



Suction (MPa)



Damage (%)

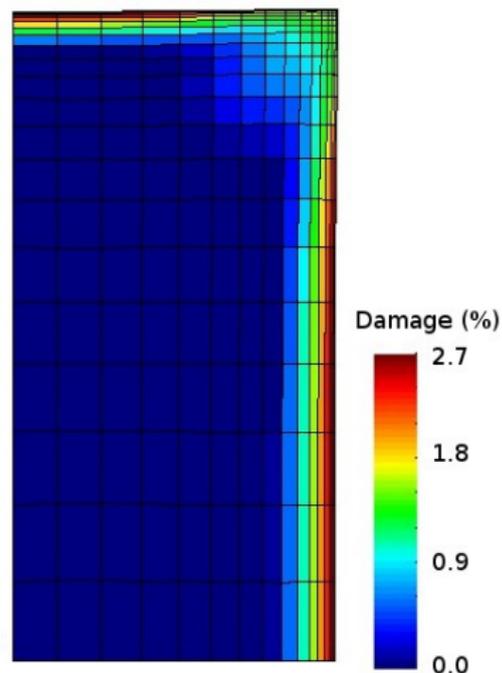
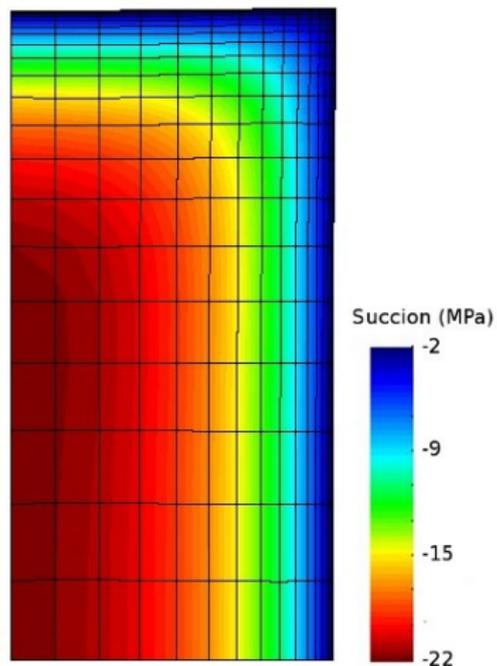


# Humidification

$$K_{w0} = 1.10^{-15} \text{ m.s}^{-1}, s_0 = 20 \text{ MPa}, s_1 = 2 \text{ MPa}, 0.2 \text{ MPa/min}$$

Pression d'eau

Endommagement

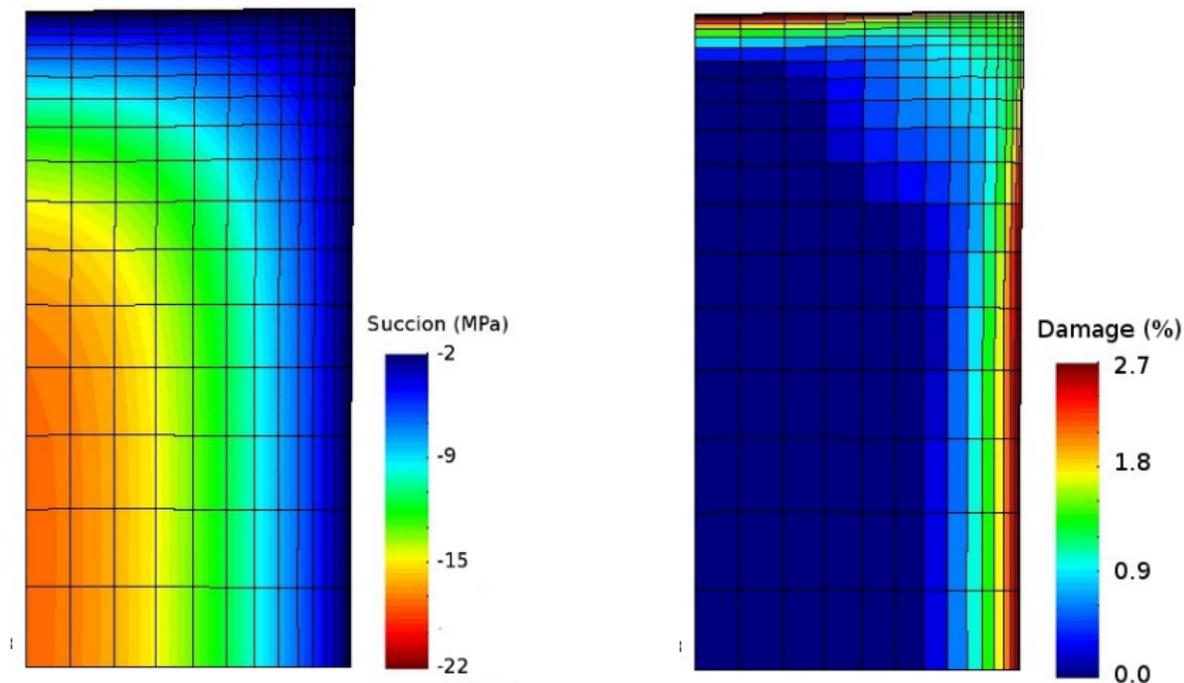


# Humidification

$$K_{w0} = 1.10^{-15} \text{ m.s}^{-1}, s_0 = 20 \text{ MPa}, s_1 = 2 \text{ MPa}, 0.2 \text{ MPa/min}$$

Pression d'eau

Endommagement

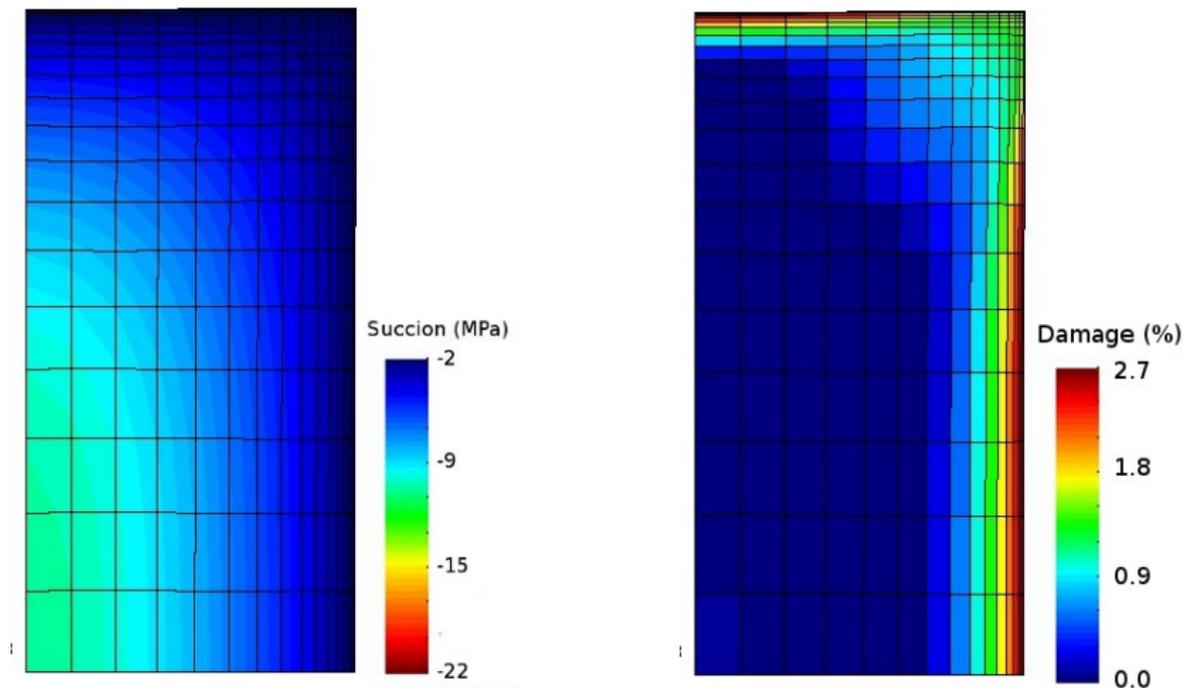


# Humidification

$$K_{w0} = 1.10^{-15} \text{ m.s}^{-1}, s_0 = 20 \text{ MPa}, s_1 = 2 \text{ MPa}, 0.2 \text{ MPa/min}$$

Pression d'eau

Endommagement

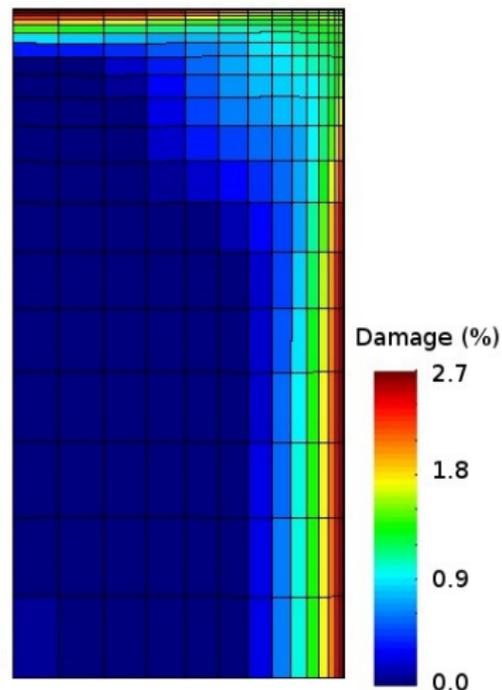
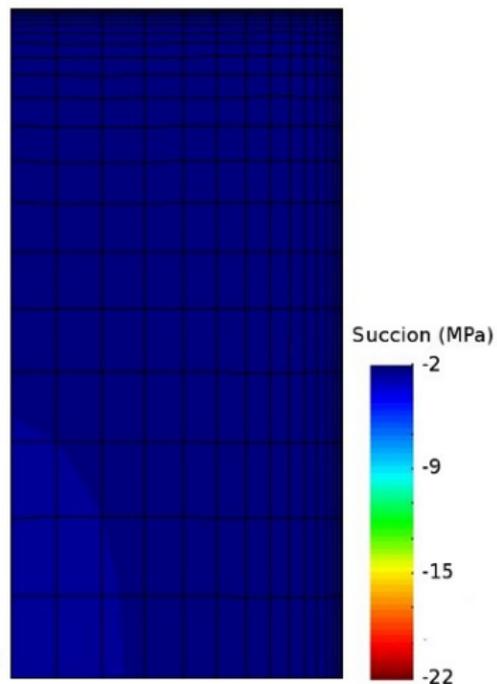


# Humidification

$$K_{w0} = 1.10^{-15} \text{ m.s}^{-1}, s_0 = 20 \text{ MPa}, s_1 = 2 \text{ MPa}, 0.2 \text{ MPa/min}$$

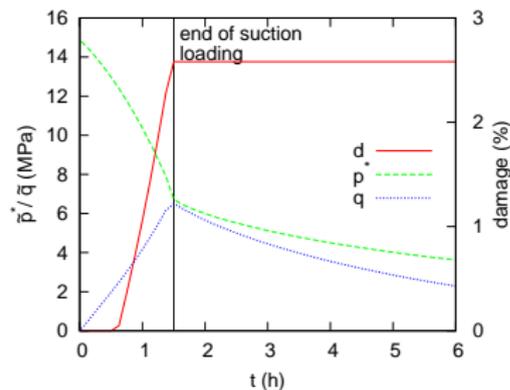
Pression d'eau

Endommagement

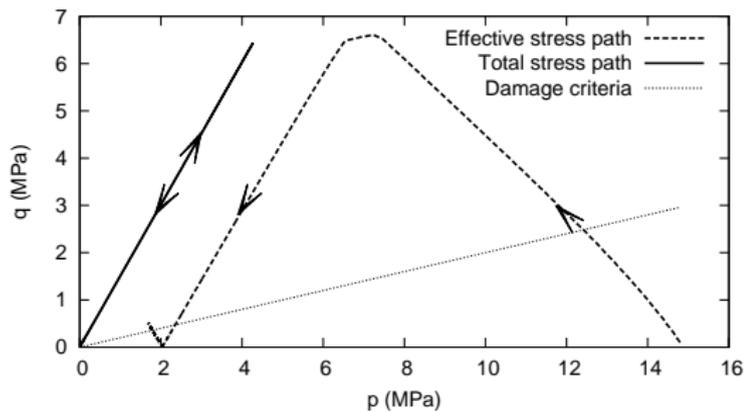


## Humidification (Point B)

## Évolution dans le temps

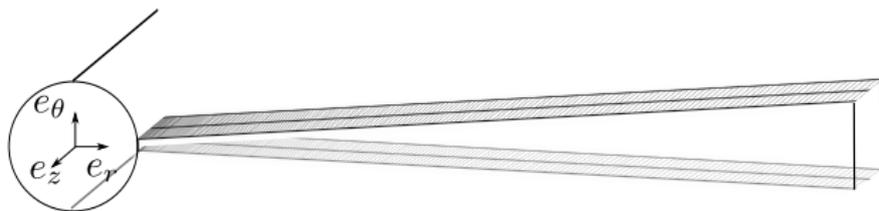


## Chemin de chargement

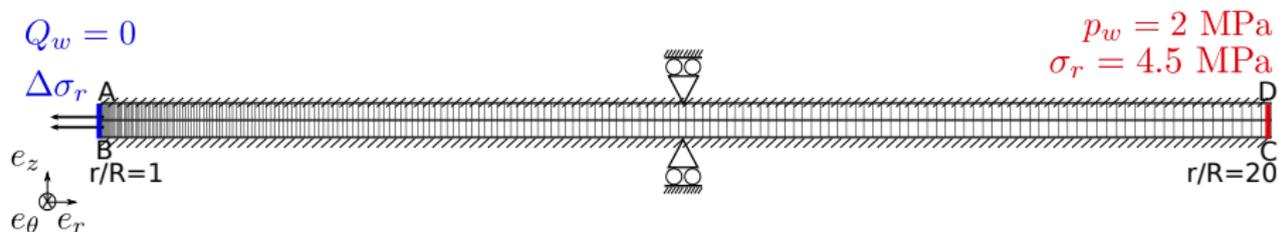


- 1 Modélisation
- 2 Simulation d'essais de laboratoire
- 3 Application à des problèmes hydro-mécaniques couplés en géomécanique
  - Endommagement due à un chargement hydrique
  - Excavation non drainée
- 4 Conclusions

## Excavation non drainée - argile de Boom

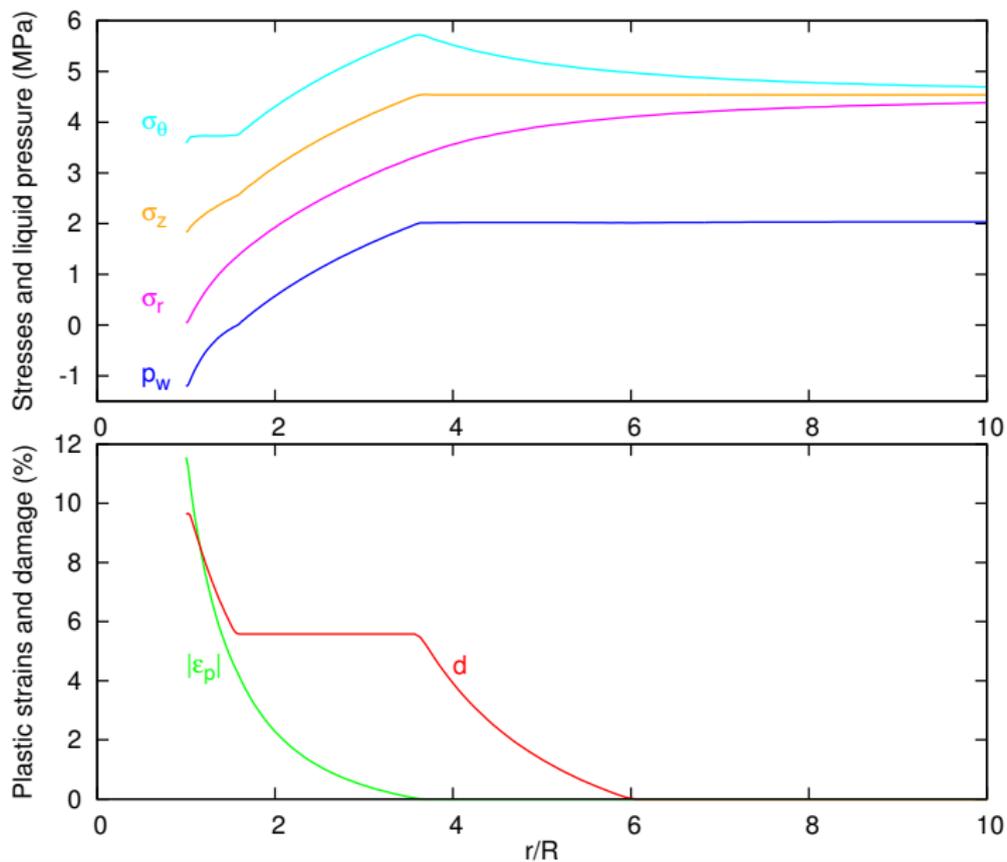


Problème axisymétrique



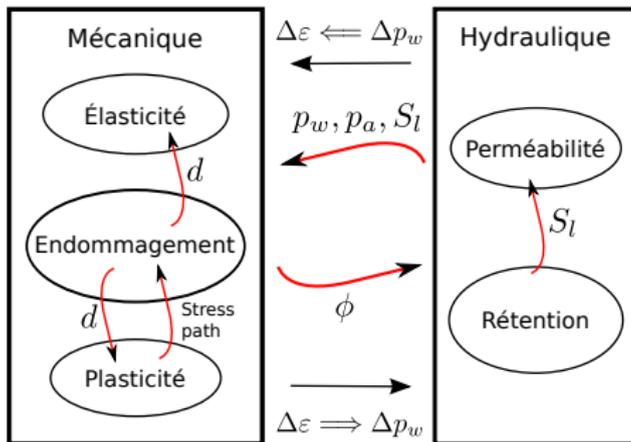
- **Conditions initiales** :  $\sigma_r = \sigma_\theta = \sigma_z = 4.5 \text{ MPa}$
- **Chargement** : AB :  $\Delta\sigma_r = -4.5 \text{ MPa}$
- **Conductivité hydraulique** :  $K_{w0} = 1.10^{-13} \text{ m.s}^{-1}$

## Évolution spatiale



- 1 Modélisation
- 2 Simulation d'essais de laboratoire
- 3 Application à des problèmes hydro-mécaniques couplés en géomécanique
- 4 Conclusions

## Conclusions



- Développement d'un modèle constitutif couplant les phénomènes d'endommagement et de plasticité pour les géomatériaux non-saturés
- Cadre de modélisation adaptable à différents matériaux
- Implémentation dans un code Éléments finis pour simuler des problèmes hydromécaniques couplés
- Nombreuses applications en géomécanique

Merci pour votre attention